

19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift  
10 DE 44 15 736 A 1

51 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
G 05 D 1/02  
G 01 L 21/04  
B 62 D 6/00

21 Aktenzeichen: P 44 15 736.3  
22 Anmeldetag: 4. 5. 94  
43 Offenlegungstag: 9. 11. 95

DE 44 15 736 A 1

71 Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE

72 Erfinder:  
Bauer, Rudolf, Dipl.-Ing., 85579 Neubiberg, DE;  
Feiten, Wendelin, Dr.rer.nat., 85579 Neubiberg, DE

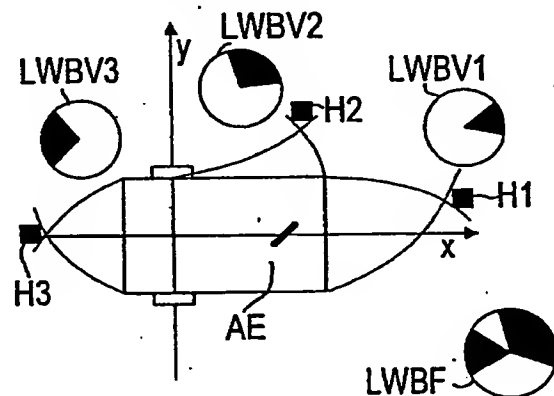
Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren zur Kollisionsvermeidung mit Hilfe eines Lenkwinkelfeldes für eine autonome mobile Einheit

57 Verfahren zur Kollisionsvermeidung mit Hilfe eines Lenkwinkelfeldes für eine autonome mobile Einheit.

Mit der Erfindung wird ein verbessertes Verfahren zur Orientierung von autonomen mobilen Einheiten vorgestellt. Dabei werden aufgrund der Lenk- und der Antriebsgeometrie der fahrbaren Einheit Kollisionsabstände zu Hindernissen ermittelt und aufgrund dieser Abstände erlaubte Lenkwinkelbereiche für die Einheit definiert. Zusätzlich wird für die Sensorausstattung der Einheit ein definierter Beobachtungshorizont vorgegeben, in welchem Hindernisse ausgewertet werden sollen. Außerdem wird um die Einheit herum ein Sicherheitsbereich definiert, in welchem sich keine Hindernisse befinden dürfen, andernfalls wird eine Rückwärtsfahrt ausgelöst. Zur Fahrwegoptimierung der Einheit werden Lenkwinkelbereiche, welche sich aus unterschiedlichen Beobachtungshorizonten und Sicherheitszonen ergeben, fallweise kombiniert.

Durch eine Herabsetzung des Sicherheitsabstandes lediglich in engen Passagen bis im Extremfall zur Gehäusekontur der Einheit, kann dort der maximal mögliche Lenkwinkel eingeschlagen werden. Dadurch wird ein höchstmögliches Maß an Manövrierbarkeit auch zwischen eng beieinanderstehenden Hindernissen gewährleistet.



DE 44 15 736 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 09. 95 508 045/251

11/31

Durch Sensoren gestützte Bewegung autonomer mobiler Einheiten in komplexen, eng mit Hindernissen bestellten, unbekannten Umgebungen, wie zum Beispiel Büros oder Wohnungen, stellt eine beträchtliche Herausforderung an die Steuerung und die Datenauswertung der mobilen Einheit dar. Eine solche Einheit, beispielsweise ein Roboter ist nur fähig nützliche Aufgaben durchzuführen, wenn sie sich zielstrebig in ihrer Umgebung bewegen kann und auch über mehrere Stunden hinweg Hindernisse vermeiden kann.

Da der Bewegungsraum der Einheit meistens unbekannt ist und sich meistens auch dynamisch verändert, ist es sinnvoll die meisten Details welche die unmittelbare Bewegung der Einheit betreffen lokal zu ermitteln. Konsequenterweise wird deshalb zwischen der Planung, welche eine Folge von Zwischenzielpunkten liefert und lokaler Manövrierung, deren Aufgabe es ist die autonome Einheit von einem Zwischenziel zu dem nächsten Zwischenziel zu bewegen unterschieden. Für diese Aufgabe werden schnelle Mechanismen benötigt, die es erlauben Hindernisse gesichert zu vermeiden und die trotzdem eine hohe Beweglichkeit der Einheit gewährleisten. Die Einheit sollte sich in unvorbereiteten Umgebungen ohne Vorausinformation bewegen können und dies mit einer angemessenen Geschwindigkeit (ca. 50 cm pro Sekunde) können. Dabei können die typischen Abstände zwischen Hindernissen in der Größenordnung der Abmessungen der autonomen mobilen Einheit oder kleiner sein. Die Passagen, welche sie bei ihrer Fahrt durchqueren müssen können dabei auch sehr eng sein. Hindernisse (zum Beispiel Personen) können sich mit einer Geschwindigkeit die vergleichbar ist mit jener der Einheit bewegen. Dies führt dazu, daß die meiste Zeit die selbstbewegliche Einheit an den Grenzen ihrer Sensorausstattung bzw. ihrer geometrischen und kinematischen Beschränkungen arbeiten muß. Erschwerend kommt hinzu, daß falls Ultraschallsensoren eingesetzt werden diese den Nachteil einer Nahbereichsblindzone und einer niedrigen Feuerrate haben.

Folgende grundlegende Arbeiten auf dem Gebiet der Orientierung von autonom operierenden mobilen Einheiten sind bekannt:

R. Bauer, W. Feiten, G. Lawitzky: Steer Angle Fields: An Approach to Robust Manoeuvring in Cluttered, Unknown Environments, Proc. Int. Workshop on Intelligent Robotic Systems, pp. 67 bis 70, July 1993.

J. Borenstein, Y. Koren: "Histogrammic In-Motion Mapping for Mobile Robot Obstacle Avoidance", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 4, August 1991.

Trotz der umfassenden Arbeiten auf dem Gebiet der selbstbeweglichen mobilen Einheiten, gibt es immer noch Schwierigkeiten bei der Auswertung von Sensorinformationen und bei der Gewährleistung einer schnellen Reaktion auf sich dynamisch ändernde Umgebungen, sowie der Berücksichtigung dieser Veränderungen im Zusammenhang mit einer lokalen Orientierung von autonomen mobilen Einheiten.

Die der Erfindung zugrundeliegende Aufgabe besteht darin, ein verbessertes Verfahren zur Kollisionsvermeidung mit Hilfe eines Lenkwinkelfeldes für eine autonome mobile Einheit anzugeben.

Diese Aufgabe wird gemäß den Merkmalen des Patentsanspruches 1 gelöst.

Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Ein Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens be-

steht darin, daß durch seine Anwendung der Rechenaufwand in der Steuereinheit einer autonomen mobilen Einheit verringert werden kann, dadurch Anwendung eines fest definierten Beobachtungsbereiches als Grundlage für eine Fahrwegplanung nur solche Hindernisse bewertet werden müssen, welche sich innerhalb dieses Beobachtungsbereiches befinden.

Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, mehrere Beobachtungsbereiche in Abhängigkeit Bewegungserfordernisse zu definieren und für diese Beobachtungsbereiche jeweils separat auch für mehrere Hindernisse, zulässige Lenkwinkelbereiche festzustellen. So können Hindernisse in unterschiedlicher Entfernung der autonom operierenden Einheit separat bewertet werden und bei einer globalen Bewegungsplanung im Sinne einer Start-Ziel-Bewegung der autonomen mobilen Einheit besser berücksichtigt werden.

Besonders günstig ist es beim Vorhandensein von mehreren Hindernissen in der Umgebung, im Beobachtungsbereich der autonomen mobilen Einheit die Lenkwinkelbereiche für die Hindernisse separat festzustellen und abzuspeichern, weiterhin eine Schnittmenge dieser erlaubten Lenkwinkelbereiche zu bilden und diese in einem Lenkwinkelbereichsfeld abzuspeichern, welches für eine aktuelle Position die erlaubten Lenkwinkel als Grundlage einer Fahrwegplanung angibt. Durch diese Vorgehensweise wird die Planung für einen Fahrweg erleichtert und die dafür benötigte Rechenzeit in der Steuereinheit der mobilen Einheit verringert.

Um einen Zusammenstoß mit statischen Hindernissen zu vermeiden sieht es das erfindungsgemäße Verfahren günstigerweise vor, daß um die Einheit herum eine Sicherheitszone definiert wird, welche von keinem Hindernis durchdrungen werden darf. So wird sichergestellt, daß auch beim Auftreten von Hindernissen im Nahbereich der Einheit durch das erfindungsgemäße Verfahren eine hohe Manövrierfähigkeit gewährleistet wird. Eine sichere Manövrierbarkeit der selbstbeweglichen mobilen Einheit auch bei hohen Geschwindigkeiten wird durch das erfindungsgemäße Verfahren günstigerweise sichergestellt in dem in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit der Beobachtungsbereich entsprechend angepaßt wird.

Günstig es für kleine Fahrgeschwindigkeiten einen kleinen Beobachtungsbereich und für vergleichsweise große Fahrgeschwindigkeiten einen großen Beobachtungsbereich zu wählen. In der Regel wird es so sein, daß die Einheit an engen Stellen mit einer kleinen Geschwindigkeit und an weiten Stellen mit einer großen Geschwindigkeit fortbewegt wird. Durch das erfindungsgemäße Verfahren wird so sichergestellt, daß die Strecke zwischen Start- und Zielpunkt möglichst schnell durchfahren werden kann.

Vorteilhaft wird mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ein Lenkwinkelbereich als Schnittmenge von zwei erlaubten Lenkwinkelbereichen gebildet, die für unterschiedliche Beobachtungsbereiche gültig sind. So wird gegebenenfalls eine langfristige Planung des Fahrweges erleichtert und eine optimale Geschwindigkeit der Einheit auf ihrem Fahrweg sichergestellt.

Um eine globale Fahrwegplanung zu erleichtern und mit angepaßter Geschwindigkeit fahren zu können, sieht es das erfindungsgemäße Verfahren vorteilhafterweise vor für einen Beobachtungsbereich mindestens zwei Sicherheitszonen zu definieren und für diese Sicherheitszonen separat die zugehörigen Lenkwinkelbereichsfelder zu ermitteln. So kann fahrsituationsabhän-

gig auf das jeweilig gültige Lenkwinkelbereichsfeld umgeschaltet werden.

Eine zyklische Durchführung des Verfahrens führt dazu, daß schnell auf Änderungen in der Umgebung reagiert werden kann.

Vorteilhaft sieht es das erfindungsgemäße Verfahren vor, auf nicht statische Hindernisse durch Rückwärtsfahrt zu reagieren.

Vorteilhafterweise wird durch das erfindungsgemäße Verfahren auch eine Manövrierbarkeit der mobilen Einheit durch enge Passagen sichergestellt, indem beim Auftreten von keinem zulässigen Lenkwinkelbereich die Sicherheitszone um die Einheit herum verkleinert wird, um bei der Berechnung der zulässigen Lenkwinkel einen höheren Spielraum zu haben. Im Extremfall wird dabei die Sicherheitszone so klein gewählt, daß sie mit den Gehäuseabmessungen der mobilen Einheit übereinstimmt.

Vorteilhaft läßt sich das erfindungsgemäße Verfahren anwenden, wenn als lokale Karten zellular strukturierte Umgebungskarten verwendet werden. Auf diese Weise lassen sich Operationen, die Hindernisse betreffen, wie beispielsweise die Berechnung von Lenkwinkelfeldern mathematisch auf Matrizenoperationen zurückführen und beschleunigen so den Rechenvorgang im Steuerrechner, womit eine kürzere Reaktionszeit erreicht wird.

Im folgenden wird die Erfindung anhand von Figuren weiter erläutert.

Fig. 1 zeigt eine autonome mobile Einheit mit einem Hindernis.

Fig. 2 zeigt eine autonome mobile Einheit mit mehreren Hindernissen.

Fig. 3 zeigt eine autonome mobile Einheit mit einem Hindernis in der Sicherheitszone.

Fig. 4 zeigt eine autonome mobile Einheit mit unterschiedlichen Beobachtungsbereichen.

Fig. 5 veranschaulicht die Ermittlung eines Lenkwinkels.

Fig. 6 erläutert verschiedene Fallbeispiele bei der Ermittlung eines Lenkwinkels für die mobile Einheit.

In Fig. 1 ist eine autonome mobile Einheit zusammen mit einem Hindernis H dargestellt. Um die autonome mobile Einheit, in der Folge Einheit genannt herum ist eine Sicherheitszone SZ1 gelegt. Diese Sicherheitszone dient bei der Berechnung des Abstandes der Einheit zu Hindernissen als Kontur der Einheit. Hierzu sind an der Sicherheitszone außen Extrempunkte der Einheit  $v_r$ ,  $v_l$ ,  $m_l$ ,  $h_l$ ,  $h_r$  und  $m_r$  vorgesehen. Mit Hilfe der Kinematik der Einheit kann nun von einer Steuerung ein Winkel festgelegt werden, unter welchem die Einheit bei Vorwärtsfahrt einen Kreisbogen beschreibt, der eben nicht zu einer Kollision mit dem Hindernis H führt.

In der Figur ist für den Winkel  $\Theta_1$  der maßgebliche Kreisbogen KB1 dargestellt welchen die Einheit bei Vorwärts-links-Fahrt beschreibt und der die Einheit am Hindernis H gerade eben vorbeiführt. Der maßgebliche Berechnungspunkt für die Kollisionsanalyse ist hierbei der Punkt  $v_r$  auf der Sicherheitszone der Einheit AE.

Zur Vorwärts-rechts-Fahrt ist der maßgebliche Winkel  $\Theta_2$ , unter welchem die Einheit den Kreisbogen KB2 beschreibt, der sie bei Vorwärts-rechts-Fahrt an dem Hindernis vorbeiführt. Vorbeifahrt an dem Hindernis bedeutet hier, daß der auf der Sicherheitszone befindliche Extrempunkt  $v_l$  gerade eben am Zentrum des Hindernisses H vorbeikommt ohne mit dem Hindernis zu kollidieren.

Aus dieser Analyse der Vorwärtsbewegung lassen

sich zwei Winkel  $\Theta_1$  und  $\Theta_2$  ableiten, welche einen verbotenen Lenkwinkelbereich LWBV beschreiben. Dieser verbotene Lenkwinkelbereich umfaßt also alle Lenkwinkel unter welchen die autonome mobile Einheit AE mit dem Hindernis kollidieren würde. Die Subtraktion dieses Lenkwinkelbereiches von  $360^\circ$  führt zu einem erlaubten Lenkwinkelbereich LWB1. Dieser erlaubte Lenkwinkelbereich LWB1 umfaßt sämtliche Lenkwinkel unter denen die Einheit vorwärts oder rückwärts fahren kann und unter denen sie nicht mit einem Hindernis H in der Umgebung kollidiert. Vereinfacht ist hier nur ein Hindernis dargestellt. Diese Analyse läßt sich jedoch auch ohne Einschränkung des erfindungsgemäßen Verfahrens für mehrere Hindernisse gleichzeitig durchführen. In Abhängigkeit des Standortes der autonomen mobilen Einheit AE erhält man nach dieser Bewegungsanalyse für den augenblicklichen Aufenthaltsort, hier beispielsweise sei der Schnittpunkt des Koordinatenkreuzes xy als Ort gewählt, einen erlaubten Lenkwinkelbereich in Relation zu einem Hindernis in der Umgebung.

Fig. 2 zeigt die Kollisionsanalyse der autonomen mobilen Einheit für mehrere Hindernisse H1 bis H3. In Abhängigkeit der Kinematik der Einheit und ihres Standortes, der sich hier im Schnittpunkt des Achsenkreuzes XY befindet, ergeben sich in Bezug auf die einzelnen Hindernisse unterschiedliche erlaubte und verbotene Lenkwinkelbereiche.

Die Bewegungsanalyse wird durchgeführt wie es in Fig. 1 beschrieben wurde. Für das Hindernis H1 erhält man einen verbotenen Lenkwinkelbereich LWBV1. Für das Hindernis H2 erhält man einen verbotenen Lenkwinkelbereich LWBV2 und für das Hindernis H3 einen verbotenen Lenkwinkelbereich LWBV3. Als Grundlage einer weiterführenden Fahrwegplanung ist es unerheblich, ob die verbotenen Lenkwinkelbereiche oder die erlaubten Lenkwinkelbereiche zu Analyse Zwecken weiterverarbeitet werden.

Durch Bildung der Schnittmenge der einzelnen ermittelten Lenkwinkelbereiche LWBV1 bis LWBV3 erhält man das Lenkwinkelbereichsfeld LWBf. Hierin sind wie zuvor die verbotenen Lenkwinkel schwarz und die erlaubten Lenkwinkel weiß dargestellt.

Zur Erleichterung der Fahrwegplanung einer autonomen mobilen Einheit können in Abhängigkeit gewählter Beobachtungsbereiche und Sicherheitszonen nur bestimmte Hindernisse berücksichtigt werden und in Abhängigkeit des jeweiligen Standortes der Einheit AE unterschiedliche Lenkwinkelbereichsfelder LWB1 abgespeichert werden. Die Abspeicherung in Feldern erlaubt es einfach mittels mathematischer Operationen auf die einzelnen Daten die je Hindernis gespeichert sind zuzugreifen. Beispielsweise können so für mehrere Hindernisse gleichzeitig Belegungsgradwerte erhöht oder erniedrigt werden.

Fig. 3 zeigt die Ermittlung eines Lenkwinkelbereiches für ein Hindernis, welches sich innerhalb der Sicherheitszone der autonomen mobilen Einheit AE befindet. Die zuvor getätigten Betrachtungen berücksichtigen hauptsächlich eine statische Umgebung. Fig. 3 veranschaulicht einen Teil des erfindungsgemäßen Verfahrens, der sich mit einer sich dynamisch ändernden Umgebung befaßt.

Wie zuvor beschrieben wurde werden Hindernisse, welche sich außerhalb der Sicherheitszone befinden, durch das erfindungsgemäße Verfahren zuverlässig vermieden indem ein Kollisionsabstand vorausberechnet wird und entsprechende Lenkwinkelbereiche für jedes

Hindernis definiert werden. Da sich jedoch auch Hindernisse in der Umgebung bewegen können, zum Beispiel Menschen, oder auch Einrichtungsgegenstände verschoben werden können, kann es geschehen, daß ein Hindernis von der autonomen mobilen Einheit AE innerhalb ihrer Sicherheitszone bemerkt wird. Falls dies der Fall ist, kann beispielsweise eine Steuerungsroutine der Einheit vorsehen, daß die Einheit sofort gestoppt wird und nun erneut ein Lenkwinkelbereichsfeld LWB1 ermittelt wird. Wie in Fig. 3 dargestellt, führt dies automatisch dazu, daß der verbotene Lenkwinkelbereich sehr groß und der erlaubte Lenkwinkelbereich LWB1 sehr klein ist. Für die Winkel  $\Theta_1$  und  $\Theta_2$  ergeben sich wiederum die Kreisbögen KB1 und KB2. Die erlaubten Lenkwinkel können nur durch Rückwärtsfahrt von der Einheit eingehalten werden. Ein Steuerprogramm der autonomen mobilen Einheit kann deshalb vorsehen, daß vor einem Hindernis abgestoppt wird, und daß Rückwärtsfahrt eingeleitet wird. Die Rückwärtsfahrt kann dann beispielsweise im Rahmen einer globalen Bewegungsplanung innerhalb eines erlaubten Lenkwinkelbereiches LWB1 erfolgen. Nachdem das Hindernis H aus der Sicherheitszone SZ1 ausgetreten ist, kann im Rahmen einer globalen Fahrwegplanung wieder zur Vorwärtsfahrt übergegangen werden und ein Lenkwinkel eingestellt werden, der auf dem kürzesten Weg zum Ziel führt.

In Fig. 4 ist eine autonome mobile Einheit AE mit verschiedenen Beobachtungsbereichen BB1 und BB2 dargestellt. Weiterhin können unterschiedlich große Sicherheitszonen *safety\_small* und *safety\_large* erkannt werden.

Fig. 4a zeigt eine autonome mobile Einheit mit der Sicherheitszone SZ1 und dem Beobachtungsbereich BB1. Vorteilhaft ist der Einsatz eines relativ kleinen Beobachtungsbereiches, das heißt klein zu den Dimensionen der autonomen mobilen Einheit AE, bei langsamen Geschwindigkeiten und in engen Passagen. Hierfür wird vorteilhafterweise auch eine enge Sicherheitszone SZ1 gewählt, damit bei der Fahrwegplanung und Kollisionsanalyse durch Berücksichtigung eines Sicherheitsabstandes keine Manövrierfähigkeit verschenkt wird. Durch die Wahl eines kleinen Beobachtungshorizontes BB1 wird erreicht, daß nur wenige Hindernisse im Nahbereich der autonomen Einheit evaluiert werden müssen. Damit wird beispielsweise ein Steuerrechner, welcher die Bewegungsplanung durchführt, in der Steuereinheit der autonomen mobilen Einheit entlastet. Beispielsweise kann deshalb auch die Evaluationsgeschwindigkeit für Hindernisse im Nahbereich der Umgebung erhöht werden. Dies bedeutet eine Evaluation von beispielsweise Sensordaten kann mit höherer Geschwindigkeit erfolgen, da nur wenige Hindernisse berücksichtigt werden müssen. Es ist auch denkbar, daß in einer engen Passage mehrere Hindernisse auftreten und diese bei der Berechnung der zulässigen Lenkwinkel zu Schwierigkeiten führen weshalb ein erhöhter Rechenaufwand notwendig wird.

Fig. 4b zeigt eine autonome mobile Einheit mit einem Beobachtungsbereich BB2, welcher größer ist als der in Fig. 4a dargestellte BB1 mit zwei Sicherheitszonen *safety\_small* und *safety\_large*.

Beispielsweise soll hier sichergestellt werden, daß die autonome mobile Einheit AE auch bei schneller Vorwärts- oder Rückwärtsfahrt nicht mit Hindernissen kollidiert. In Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit der Einheit kann deshalb eine größere Beobachtungszone BB2 gewählt werden. Damit wird einem Steuerrechner

eine weiterreichende Fahrwegplanung ermöglicht. Diese Vorgehensweise bietet sich auch an, wenn wenige Hindernisse in der Umgebung vorhanden sind, so daß durch eine geeignete Wahl eines Beobachtungsbereiches BB2 beispielsweise die Zahl der zu evaluierenden Hindernisse immer konstant gehalten werden kann. Damit kann beispielsweise eine gleichmäßige Auslastung des Rechners erreicht werden bzw. eine Überlastung verhindert werden. Zur Kompensation der Massenträgheit bei schneller Vorwärtsfahrt der autonomen Einheit AE können unterschiedlich große Sicherheitszonen *safety\_small* und *safety\_large* gewählt werden. In Abhängigkeit einer Fahrgeschwindigkeit wird zum Beispiel bei kleiner Geschwindigkeit *safety\_small* und bei großer Geschwindigkeit *safety\_large* gewählt. Es ist aber auch denkbar, daß zu ermittelnde Lenkwinkelbereichsfelder simultan für die große und für die kleine Sicherheitszone ermittelt werden. Lenkwinkelbereichsunterschiede, die sich aus dem Beobachtungsbereich BB2 und dem unterschiedlichen großen Sicherheitszonen ergeben, können für die Fahrwegplanung ausgewertet werden. Beispielsweise kann beim Eintritt eines Hindernisses in die Sicherheitszone *safety\_large* ein Abbremsvorgang der autonomen mobilen Einheit eingeleitet werden.

Fig. 5 zeigt wie aus einer Kombination von unterschiedlichen Sicherheitszonen SZ2 und SZ1 mit unterschiedlichen Beobachtungshorizonten ein erlaubter Lenkwinkel gefunden werden kann.

Hier werden exemplarisch nur drei Kombinationen FN, FM und FG betrachtet. Es sind durchaus andere Kombinationen von Sicherheitsabständen und Beobachtungsbereichen denkbar. Ohne das erfindungsgemäße Verfahren zu beeinträchtigen sind verschiedene Kombinationen aus Sicherheitszonen und Beobachtungsbereichen möglich, um eine Fahrwegplanung global oder auch lokal für die autonome Einheit durchzuführen. Hier sind exemplarisch drei Kombinationen angegeben, mit welchen experimentelle Untersuchungen durchgeführt wurden und die sich als günstig herausgestellt haben.

Mit FN wird ein Nahfeld angegeben in welchem die Sicherheitszone sehr klein gewählt wird, das heißt beispielsweise im Bereich von 1 cm liegt und der Beobachtungsbereich im Bereich von 15 cm liegt. In der Regel sollte FN angewendet werden im Nahbereich bei kleiner Geschwindigkeit und beim Durchfahren enger Passagen. Bei den Kombinationen FM und FG ist ein konstanter Beobachtungsbereich mit beispielsweise einer Ausdehnung von 45 cm vorgesehen, wobei jedoch der Kollisionsanalyse bei FM eine kleinere Sicherheitszone SZ1 und für FG eine größere Sicherheitszone SZ2 zugrundegelegt wurde.

Da sich direkt vor der Einheit das Hindernis H befindet, kann der erste im Rahmen einer globalen Fahrwegplanung festgelegte Lenkwinkel des *steer1* nicht eingehalten werden. Es muß deswegen ein Ausweichwinkel des *steer2* gefunden werden. Wie erkannt werden kann ergibt sich in FN kein zulässiger Steuerungswinkel. Ebenso kann erkannt werden, daß in FG kein zulässiger Lenkwinkel gefunden wird, der noch Vorwärtsfahrt der autonomen mobilen Einheit erlaubt. Lediglich in FM ergibt sich der Steuerungswinkel des *steer2* als zulässiger Steuerungswinkel, denn er befindet sich im weißen Bereich, das heißt im zulässigen Lenkwinkelbereich. Hier wird plastisch veranschaulicht, daß durch eine Variation der Größe der Sicherheitszone, hier ein Übergang von SZ2 nach SZ1 und eine geeignete Wahl eines Beobachtungsbereiches, beispielsweise 45 cm auch in

engen Passagen, oder vor Hindernissen ein optimaler Lenkwinkel gefunden werden kann. Optimal bedeutet hier es wird zwar nicht direkte Vorwärtsfahrt erreicht, wie sie durch des\_steer1 vorgegeben wird, jedoch kann ein Lenkwinkel gefunden werden, der immerhin noch eine Fahrt in Richtung des Zieles der autonomen Einheit erlaubt. Solche Ausweichmanöver können durchaus im Rahmen einer Bewegungssteuerung und einer globalen Fahrwegplanung beispielsweise mit einem Wandfolgeverfahren kombiniert werden.

Fig. 6 zeigt ein weiteres Beispiel zur Ermittlung eines Lenkwinkels für eine autonome mobile Einheit. In Fig. 6a ist dargestellt, daß sich der gewünschte Steuerwinkel, welcher beispielsweise im Rahmen einer globalen Fahrwegplanung ermittelt wurde, und der resultierende Steuerwinkel des\_steer und res\_steer übereinstimmen und diese gefahren werden können.

In Fig. 6b ist veranschaulicht, wie beispielsweise ein anderer resultierender Steuerwinkel res\_steer als der gewünschte Steuerwinkel des\_steer gewählt wird, obwohl beide innerhalb eines erlaubten Lenkwinkelbereiches anzutreffen sind. Wie Fig. 6b zeigt, ist der erlaubte Lenkwinkelbereich sehr klein. Diese Situation kann eintreten, wenn sich die selbstbewegliche mobile Einheit innerhalb einer engen Passage bewegt. Um für die Weiterfahrt optimale Ausweichmöglichkeiten bieten zu können, wird der resultierende Steuerwinkel res\_steer in der Mitte des erlaubten Lenkwinkelbereiches eingestellt. Dies hat zur Folge, daß sich die autonome Einheit AE exakt in der Mitte zwischen zwei ermittelten Hindernissen, oder in der Mitte einer engen Passage bewegen kann.

Fig. 6c zeigt ein weiteres Beispiel zur Ermittlung eines gültigen Lenkwinkels. Auch hier ist der gewünschte Steuerwinkel des\_steer angegeben und der resultierende Lenkwinkel res\_steer gezeigt. Da sich der gewünschte Steuerwinkel innerhalb eines verbotenen Lenkwinkelbereiches befindet, muß ein Steuerwinkel gefunden werden, welcher sich innerhalb des zulässigen Lenkwinkelbereiches befindet. Hierzu sieht es das erfindungsgemäße Verfahren vor, beispielsweise den gewünschten Steuerwinkel um eine festgelegte experimentell bestimmte Schrittweite zu variieren, um einen resultierenden Steuerwinkel zu finden, der sich innerhalb des erlaubten Lenkwinkelbereiches befindet. Um eine Ausweichrichtung festzulegen wird die Variation beispielsweise zunächst links und dann rechts probiert. So wird festgestellt, ob durch die gewählte Winkelvariation sector\_width2 ein resultierender Lenkwinkel gefunden werden kann, der sich innerhalb des erlaubten Lenkwinkelbereiches befindet. In Fig. 6c führt die Variation des gewünschten Steuerungswinkels mit sector\_width2 nach rechts zu einem gangbaren Ergebnis. Es ist weiterhin denkbar, daß die Variationsschrittweite in Abhängigkeit der Größe der verbotenen Lenkwinkelbereichszone vergrößert oder verkleinert wird. Die in Fig. 6a bis c dargestellten Strategien wurden experimentell durch eine gute Fahrwegplanung bestätigt.

Vorteilhaft läßt sich das erfindungsgemäße Verfahren vor allen Dingen beim Einsatz von zellular strukturierten Umgebungskarten zur Orientierung der autonomen mobilen Einheit einsetzen. Die Lenkwinkelbereiche für die einzelnen Hindernisse lassen sich besonders einfach in einem Feld abspeichern, auf das während der Bewegung der mobilen Einheit global zugegriffen werden kann. Translationen, oder auch die Verringerung von Belegungsgradwerten lassen sich so für alle Hindernisse gemeinsam durchführen.

Allgemein kann beispielsweise wie folgt vorgegangen werden:

Bei der folgenden Beschreibung werden wechselweise die Fig. 5 und 6 referenziert. Die Bezugnahme läßt sich aus den jeweiligen Bezugszeichen ableiten.

Es wird vorzugsweise versucht zuerst immer einen passenden Lenkwinkel im Bereich FG zu finden, damit die Einheit den größeren Sicherheitsabstand zu den Hindernissen hält. Die Geschwindigkeit der Einheit kann dann auch relativ groß gewählt werden.

Ist der gewünschte Lenkwinkel (des\_steer) verboten, so wird im Bereich FG von des\_steer aus nach links und rechts bis zu einer maximalen Suchweite (search\_width = 90°) gesucht, ob ein Lenkwinkel erlaubt ist. Der nächste erlaubte Lenkwinkel wird dann gefahren. Bei des\_steer2 in Fig. 5 wird z. B. der Lenkwinkel a gefahren.

Wird innerhalb search\_width kein erlaubter Lenkwinkel im Bereich FG gefunden, so wird mit dem selben Algorithmus im Bereich FM nach einem passenden Steuerungswinkel gesucht. Bei des\_steer1 wird z. B. im Bereich FG kein Lenkwinkel gefunden. Im Bereich FN wird dann der Lenkwinkel b gefunden. Falls ein Lenkwinkel aus dem Bereich FM zum Fahren genommen wird, so wird auch die Geschwindigkeit reduziert, da der Sicherheitsabstand kleiner ist.

Wird sowohl im Bereich FG als auch im Bereich FM kein Lenkwinkel gefunden, dann schwenkt die Einheit beispielsweise auf der Stelle hin und her. Dadurch sollen fälschlicherweise belegte Gridzellen in einer zellular strukturierten Karte gelöscht werden.

Ist der gewünschte Lenkwinkel des\_steer befahrbar, dann wird zum Beispiel zusätzlich noch geprüft, ob nach links und nach rechts noch einige Lenkwinkel befahrbar sind.

Sind in jede Richtung bis mindestens sector\_width/2 die Lenkwinkel noch befahrbar, so wird wie in Fig. 6a res\_steer identisch des\_steer gewählt.

Sind nach links und rechts nicht mehr ausreichend viele Lenkwinkel erlaubt, so wird res\_steer beispielsweise so gewählt, daß er sich wie in Fig. 6b in der Mitte eines erlaubten Lenkwinkelbereiches befindet. Diese Maßnahme hat zur Folge, daß die Einheit in einer engen Passage genau in der Mitte fährt.

Befindet sich der gewünschte Lenkwinkel in einem verbotenen Bereich, so wird in beiden Richtungen nach einem erlaubten Lenkwinkel gesucht. Wenn nun ein erlaubter Winkel gefunden wurde, so wird beispielsweise erneut die Mitte eines erlaubten Sektors gesucht. Ist die Menge der gefundenen erlaubten Lenkwinkel größer als sector\_width, dann wird zum Beispiel derjenige Lenkwinkel ausgewählt, der wie in Fig. 6c sector\_width/2 vom ersten erlaubten Lenkwinkel entfernt ist.

Dies bewirkt, daß die Einheit beim Vermeiden von Hindernissen etwas stärker als unbedingt notwendig ausweicht, wenn genügend freier Platz vorhanden ist. Diese Verhaltensweise ist sinnvoll, da die Einheit dann mehr Platz zum Hindernis läßt und nicht so stark abbremsen muß.

Die Lenkwinkelbereichsfelder können sehr gut zur Geschwindigkeitssteuerung verwendet werden.

Eine einfache Geschwindigkeitssteuerung ist möglich, wenn man jedem Lenkwinkelbereichsfeld einen Geschwindigkeitsfaktor zuordnet.

$$v_{ref} = speed\_factor \cdot v_{ref\_max}$$

$v_{ref}$  ist die Geschwindigkeit, die das virtuelle Antriebsrad (Nachlaufad) fahren soll.  $v_{ref\ max}$  ist eine vorgegebene maximale Geschwindigkeit. Wird nun ein Lenkwinkel aus dem Bereich FG genommen, so wird auch der entsprechende Geschwindigkeitsfaktor für dieses Feld eingestellt. Der Geschwindigkeitsfaktor für dieses Feld beträgt beispielsweise 1,0, d.h. maximale Geschwindigkeit, da hierfür die größte Sicherheitszone verwendet wird. Die Geschwindigkeits-Faktoren der Bereiche FM und FN sind angemessen kleiner zu wählen.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Kollisionsvermeidung für eine autonome mobile Einheit,
  - a) bei dem unter Zuhilfenahme mindestens der Antriebs- und Lenkgeometrie, sowie der äußeren Abmessungen der mobilen Einheit mindestens der kürzeste Fahrweg der Einheit von ihrem Standort bis zur Kollision mit mindestens einem Hindernis als Kollisionsabstand ermittelt wird,
  - b) bei dem unter Verwendung der Geometriedaten aus a) und des Kollisionsabstandes jeweils ein an der Einheit einzustellender Lenkwinkel ermittelt wird, der bei Rechts- und Linksvorbeifahrt der Einheit am mindestens einen Hindernis eben nicht zu einer Kollision mit dem Hindernis führt, so daß sich daraus ein erster erlaubter Lenkwinkelbereich in Bezug auf den Standort der autonomen mobilen Einheit ergibt,
  - c) und bei dem nur solche Hindernisse berücksichtigt werden, welche sich innerhalb eines festgesetzten variablen Beobachtungsbereiches zwischen der Einheit und einer um sie herumgezogenen Grenzlinie befinden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem mindestens zwei Beobachtungsbereiche festgesetzt werden, wobei ein erster Beobachtungsbereich vergleichsweise klein zu den Abmessungen der Einheit, und ein zweiter Beobachtungsbereich vergleichbar mit den Abmessungen der Einheit festgesetzt und jeweils mindestens ein erlaubter Lenkwinkelbereich bestimmt wird.
3. Verfahren nach einem der obigen Ansprüche,
  - a) bei dem je Hindernis mindestens ein erlaubter Lenkwinkelbereich ermittelt und in einem Lenkwinkelbereichsfeld abgelegt wird
  - b) und bei dem der für die autonome mobile Einheit erlaubte Lenkwinkelbereich als Schnittmenge aus mehreren erlaubten Lenkwinkelbereichen des Lenkwinkelbereichsfeldes gebildet wird.
4. Verfahren nach einem der obigen Ansprüche, bei dem lediglich solche Hindernisse berücksichtigt werden, welche sich außerhalb einer Sicherheitszone um die autonome Einheit herum befinden, wobei die Sicherheitszone kleiner als der Beobachtungsbereich ist.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, bei dem der Beobachtungsbereich in Abhängigkeit einer von der Einheit gefahrenen Fahrgeschwindigkeit gewählt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem für vergleichsweise kleine Fahrgeschwindigkeit mindestens der erste Beobachtungsbereich und für ver-

gleichsweise große Fahrgeschwindigkeit mindestens der zweite Beobachtungsbereich gewählt wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 6, bei dem der erlaubte Lenkwinkelbereich als Schnittmenge des für den ersten Beobachtungsbereich erlaubten Lenkwinkelbereiches mit dem für den zweiten Beobachtungsbereich erlaubten Lenkwinkelbereich gebildet wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 7, bei dem für mindestens einen Beobachtungsbereich mindestens zwei Sicherheitszonen festgesetzt, und die jeweils zugehörigen Lenkwinkelbereichsfelder ermittelt werden.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche das zyklisch ausgeführt wird.
10. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem nach Feststellung eines Hindernisses in einer Sicherheitszone, die autonome mobile Einheit rückwärts fährt.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 11, bei dem falls kein erlaubter Lenkwinkelbereich bestimmbar ist, dies dazu führt, daß die Sicherheitszone verkleinert wird.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die autonome mobile Einheit sich anhand einer zellular strukturierten Umgebungskarte orientiert und ein Hindernis in der Karte durch einen Belegungsgrad angezeigt wird.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

FIG 1

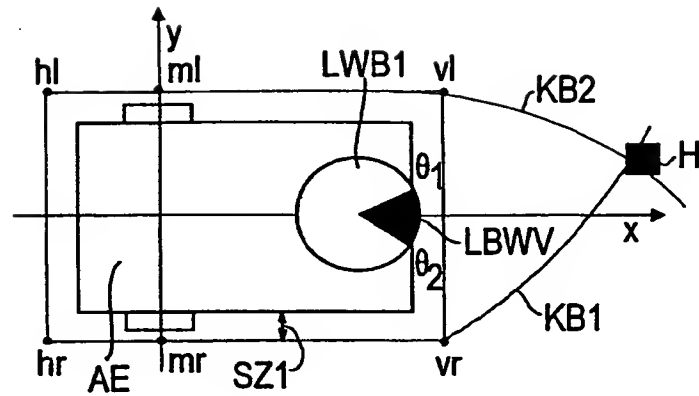


FIG 2

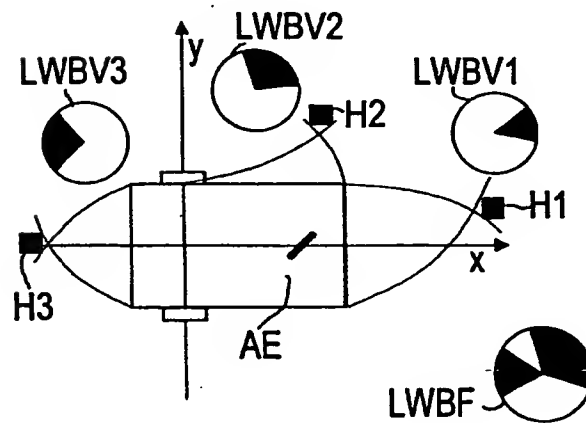




FIG3

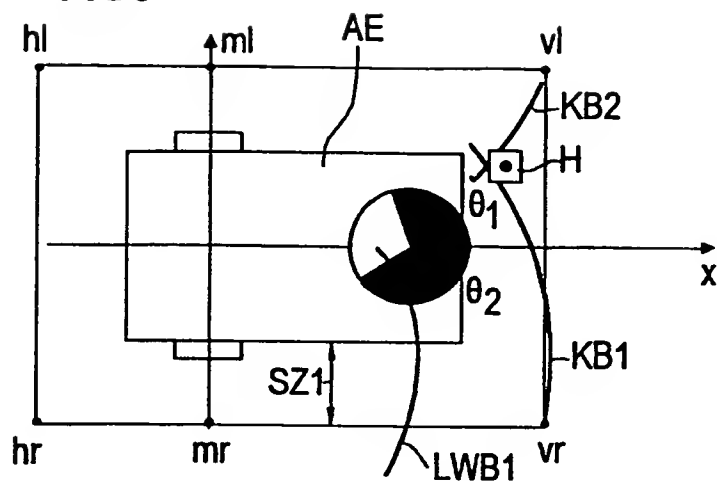


FIG4

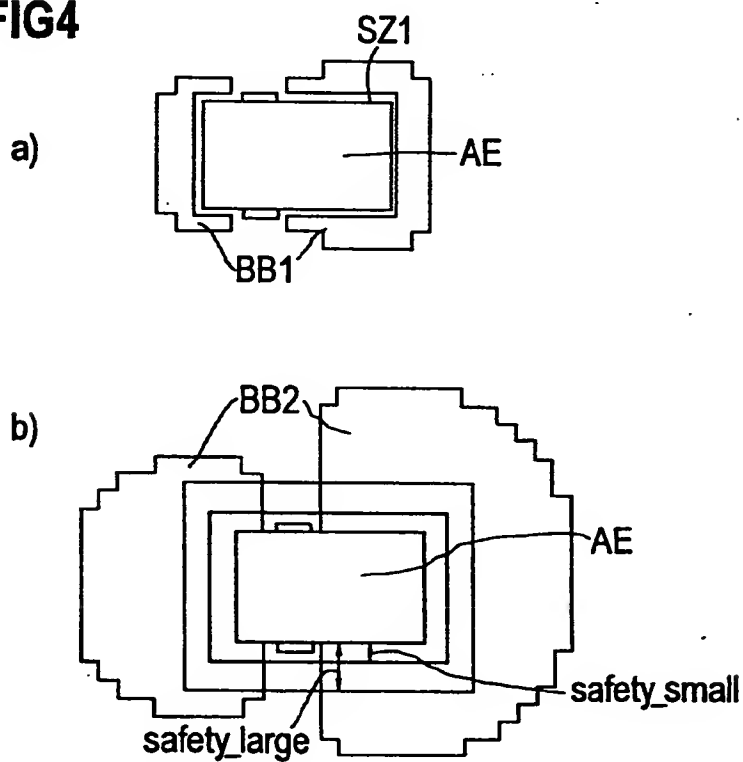


FIG5

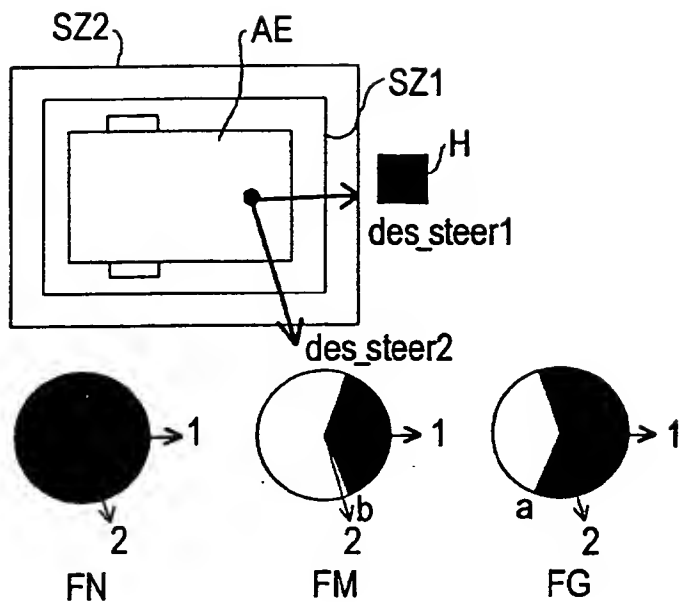
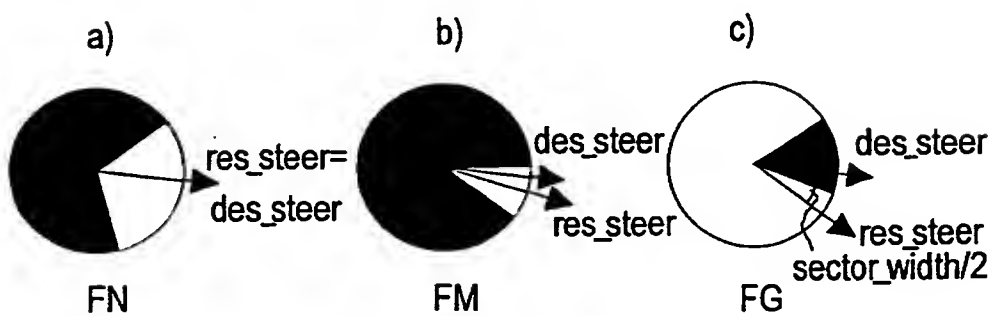


FIG6



PUB-NO: DE004415736A1

DOCUMENT-IDENTIFIER: DE 4415736 A1

TITLE: Robot collision prevention using  
steering angle field control

PUBN-DATE: November 9, 1995

INVENTOR-INFORMATION:

NAME	COUNTRY
BAUER, RUDOLF DIPL ING	DE
FEITEN, WENDELIN DR RER NAT	DE

ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME	COUNTRY
SIEMENS AG	DE

APPL-NO: DE04415736

APPL-DATE: May 4, 1994

PRIORITY-DATA: DE04415736A ( May 4, 1994)

INT-CL (IPC): G05D001/02, G01L021/04 , B62D006/00

EUR-CL (EPC): G05D001/02

ABSTRACT:

CHG DATE=19990617 STATUS=O>At least the shortest distance of travel from the position of the robot (AE) until it collides with at least one obstruction e.g. a person (H) is determined as the collision distance with the aid of at least the drive and steering geometry and the external dimensions of the mobile unit. The data are used to determine a steering angle for

which the unit passes  
the obstruction without a collision occurring, resulting in  
a first allowed  
steering angle range wrt. the unit's position.